

## Beanspruchung und Bemessung von Holzpählen im Küstenwasserbau

Dipl.-Ing. Frank Weichbrodt  
Dr. rer. nat. Christian Dede  
Dipl.-Ing. Jörg Radomski  
Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhasse

Institut für Umweltingenieurwesen, Universität Rostock

### Einführung

Holzpählbuhnen werden an der Ostsee zur Stabilisierung von sandigen erosiven Küstenabschnitten eingesetzt. Die Einspannlänge der einzelnen Pfähle wird seit über 100 Jahren nach Faustformeln festgelegt, die als Eingangsgröße ausschließlich die Wassertiefe berücksichtigen.

Im Forschungsvorhaben „Beanspruchung und Bemessung von Holzpählen im Küstenwasserbau“ wurde ein Bemessungsverfahren entwickelt, das die notwendige Einspannlänge von Buhnenpfählen auf natur- und ingenieurwissenschaftlicher Grundlage abhängig vom Baugrund, der Wassertiefe, den lokalen Seegangs- und Eisbedingungen und der Position des Pfahls in der Pfahlreihe bestimmt. Dazu war es notwendig, alle am System Holzpahl - Baugrund auftretenden treibenden und haltenden, statischen und dynamischen Kräfte zu erfassen und zu bewerten. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden als maßgebliche Belastungen die Beanspruchung von Buhnenpfählen durch Seegang und durch vertikale Eislasten untersucht. Zusätzlich wurden die Pfahlhaltekräfte in verschiedenen Baugrundtypen in situ bestimmt.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des o.g. Forschungsvorhabens vom BMBF gefördert (03KIS023) und vom Institut für Wasserbau der Universität Rostock in Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Rostock von 2001 bis 2005 durchgeführt.

### Untersuchungen

#### Vertikale Eislasten

Vertikale Eiskräfte stellen einen wesentlichen Lastfall für die Bemessung der Einspannlänge von Holzpählen im Küstenwasserbau dar. Vertikale Eiskräfte entstehen durch eine an den Pfählen festgefrorene geschlossene Eisdecke, die durch Wasserstandsänderungen angehoben oder gesenkt wird. Die übertragbaren Kräfte werden durch Bruchvorgänge im Eis, am Pfahl oder in Pfahlnähe, begrenzt.

Die entstehenden aufwärts gerichteten Vertikalkräfte (Eishub), müssen allein von der Mantelreibung des Pfahls aufgenommen werden. Bei ungenügender Einspannlänge der Pfähle können

einzelne Pfähle aus dem Baugrund gezogen werden (sog. ice-jacking). Dieser Vorgang kann sich im Verlaufe eines Eiswinters mehrmals wiederholen.

Durch Laborversuche in einer Klimakammer wurde untersucht, welche vertikalen Kräfte auf eingefrorene Holzpfähle im Fall steigender Wasserstände tatsächlich übertragen werden können. Die haltenden Kräfte von Buhnenpfählen im Boden (Mantelreibung) wurden durch Zugversuche an Buhnenpfählen bestimmt, um einen Vergleich mit den Belastungen durch Eis zu ermöglichen.

#### 1. Laborversuche

Da Eiswinter an der deutschen Ostseeküste nicht vorhersagbar eintreten, wurden die von einer am Pfahl festgefrorenen Eisdecke auf den Pfahl übertragbaren vertikalen Kräfte in einer Klimakammer untersucht. Im Experiment wird ein Pfahl in einen kreisförmigen Wassertank (Durchmesser 2,5m, Tiefe 0,8m) in eine Eisdecke eingefroren und mit einer definierten Geschwindigkeit bis zum Versagen durch das Eis gedrückt. Die Messungen zeigen, dass die nach deutschen Normen (Arbeitsausschuss Ufereinfassungen der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.: Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen", EAU 2004, 600 S., Berlin 2005) errechneten vertikalen Eislasten zu niedrig liegen. Die Klärung der festgestellten Abweichungen erfordert einen grundsätzlich anderen physikalischen Ansatz als der der EAU.

Da die Randbedingungen im Labor Versuche unter Bemessungseisdicken nicht zuließen, wurden die Ergebnisse mit Hilfe einer numerischen Modellierung extrapoliert.

#### 2. Zugversuche

Für eine Dimensionierung von Buhnenpfählen gegen Eishub ist neben den Beanspruchungen die Kenntnis der Haltekräfte wesentlich. In Zugversuchen wurde an Pfählen mit bekannten Einbindetiefen und bekanntem Baugrundaufbau der Widerstand gegen Zugkräfte gemessen. Die Ergebnisse wurden mit aus dem Schrifttum verfügbaren Berechnungsansätzen zur Ermittlung von Zugpahlwiderständen verglichen.

#### 3. Ergebnisse

Durch Gegenüberstellung von in situ gemessenen Pfahl-Haltekräften einerseits und vertikalen Eiskräften aus Laborversuchen und Modellrechnungen andererseits können Pfähle gegen vertikale Eislasten bemessen werden.

Das entwickelte Bemessungsverfahren verknüpft

diese Ergebnisse mit lokalen Baugrunddaten und lokalen Eisdaten aus der Eisstatistik des BSH.

## Bodenverflüssigung infolge seegangsinduzierter Pfahlschwingungen

Bei der Beanspruchung von Bühnenpfählen durch brechende Wellen treten Pfahlschwingungen auf. Durch die Übertragung der Schwingungen in den Baugrund (meist wassergesättigte Sande) können Bodenverflüssigungseffekte auftreten, wodurch die haltenden Kräfte vermindert und damit die Stabilität der Bühnenpfähle herabgesetzt wird.

Zur Abschätzung von Bodenverflüssigungseffekten im Umfeld schwingender Pfähle wurden Amplitude, Frequenz und Dauer der Pfahlschwingungen sowie der Porenwasserüberdruck infolge Pfahlbewegung untersucht. An verschiedenen Versuchsstandorten an der mecklenburgischen Ostseeküste wurden Seegang (Wellenmessboje / Druckmessdose), seegangsinduzierte Pfahlbewegungen (Beschleunigungssensoren am Pfahl) und die Randbedingungen am Messstandort (Wassertiefe / UW-Kamera) gleichzeitig erfasst. Die synchrone Messung von Seegang und Pfahlbewegungen erlaubt Aussagen über den Zusammenhang beider Größen und die Prognose von Pfahlbewegungen unter Extrembelastungen.

Zur Untersuchung der Porenwasserdruckentwicklung infolge Pfahlschwingungen wurde ergänzend eine Versuchsanlage aufgebaut, die eine Aufzeichnung von Porenwasserüberdruck in Abhängigkeit von der Anregung und dem Abstand vom schwingenden Pfahl in verschiedenen Tiefen ermöglicht. Der Versuchspfahl wurde durch einen steuerbaren Kolbenvibrator mit den Eingangsdaten (Frequenz, Amplitude, Schwingungsdauer) aus den Pfahlbewegungsmessungen angeregt.



Abb. 1: Zugversuchseinrichtung an der zur Ermittlung von Pfahlwiderständen

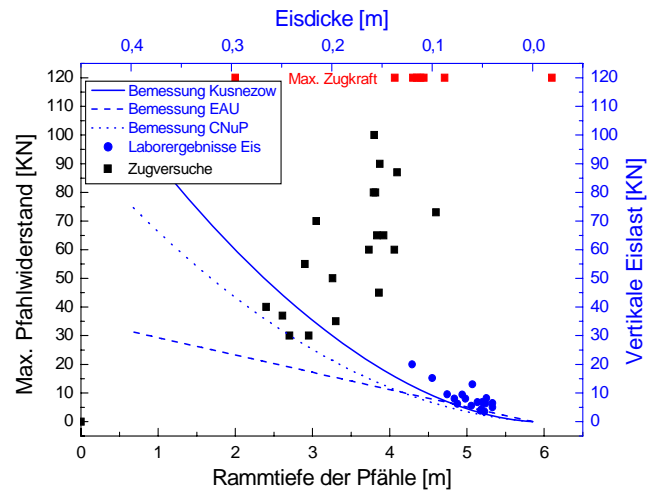


Abb. 2: Vergleich von vertikalen Eiskräften und Pfahlwiderständen aus Zugversuchen

## Ergebnisse

Durch das Messprogramm wurde der Zusammenhang zwischen Seegang, Pfahlbewegungen und Porenwasserdruck in Abhängigkeit vom Baugrundaufbau, Pfahllänge und Wassertiefe untersucht. Maßgebliche Pfahlbewegungen sind demnach an brechende Wellen bei Starkwindereignissen mit niedrigen Wasserständen gebunden. Bei erhöhten Wasserständen werden die Bühnenpfähle aufgrund ihrer geringen Höhe (0,5 m über Mittelwasser) nur gering beansprucht.

Die beobachteten und errechneten Pfahlbewegungen bewirken im Untergrund eine Erhöhung des Porenwasserdrucks, die jedoch nur im Bereich der oberen 0,5 m eine vollständige Aufhebung der effektiven Spannungen (Bodenverflüssigung) bewirkt. Unterhalb dieser Tiefe kommt es zu einer Reduzierung der Haltekräfte.